

**Далбаева Елена Александровна**

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр СО РАН", младший научный сотрудник, г. Якутск, ул. Петровского, 2  
e-mail: [aselka-333@mail.ru](mailto:aselka-333@mail.ru)

**Ерофеевская Лариса Анатольевна**

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр СО РАН" обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, к.б.н., старший научный сотрудник, г. Якутск, ул. Петровского, 2,  
e-mail: [lora-07.65@mail.ru](mailto:lora-07.65@mail.ru)

**Вит Алина Александровна**

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр СО РАН" обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Инженер-исследователь, г. Якутск, ул. Петровского, 2,  
e-mail: [alina\\_vit@list.ru](mailto:alina_vit@list.ru)

## **ВЛИЯНИЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МИКРОФЛОРУ КРИОЛИТОЗОННЫХ ПОЧВ РЕСПУБЛИКИ САХА**

*Аннотация:* В статье рассматривается роль микроорганизмов в биоремедиации почв нефтебазы, загрязнённых нефтепродуктами. Выявлено, что высокий pH способствует преобладанию бактерий и подавляет грибки. Биоремедиация снижает фитотоксичность и активизирует азотфиксирующие бактерии, но негативно влияет на нитрификацию и денитрификацию из-за токсичных веществ. Исследование подчеркивает важность правильного подбора методов биоремедиации для конкретного типа загрязнения, чтобы максимизировать положительные результаты и минимизировать негативные последствия для микробной флоры. Результаты данного исследования могут способствовать разработке новых и более эффективных подходов к

санированию почв, загрязненных нефтепродуктами, через более глубокое понимание роли микроорганизмов в этих процессах.

**Ключевые слова:** нефтезагрязненные почвы; загрязнение окружающей среды; рекультивация; биопрепарат; углеводородокисляющие микроорганизмы, мерзлотные почвы.

## INFLUENCE OF OIL PRODUCTS ON THE MICROFLORA OF PERMAFROST SOILS IN THE SAKHA REPUBLIC

**Annotation:** *The article examines the role of microorganisms in the bioremediation of tank farm soils contaminated with petroleum products. It was found that high pH promotes the predominance of bacteria and suppresses fungi. Bioremediation reduces phytotoxicity and activates nitrogen-fixing bacteria, but negatively affects nitrification and denitrification due to toxic substances.*

**Keywords:** *oil-contaminated soils; environmental pollution; reclamation; biological products; hydrocarbon-oxidizing microorganisms, permafrost soils.*

Исследование микробиоты почв на территориях нефтебаз раскрывает её важность в процессах биodeградации углеводородных загрязнений. Эти микроорганизмы, обитающие в почве, играют центральную роль в естественных процессах детоксикации грунтов, разлагая нефтяные компоненты и способствуя восстановлению экологического баланса. В рамках микробиологического анализа особое внимание уделяется выявлению и характеристике аборигенных углеводородокисляющих микроорганизмов, которые демонстрируют возможности эффективного расщепления нефти и её производных, особенно в условиях криолитозоны [1-2].

Такие исследования помогают не только понять механизмы биоразложения углеводородов, но и способствуют разработке методов биологической ремедиации, адаптированных к экстремальным условиям окружающей среды. Важность подобных исследований усиливается в условиях

арктических и субарктических регионов, где традиционные методы очистки могут быть неэффективны. В этом контексте, ключевым аспектом является идентификация штаммов микроорганизмов, которые не только активно участвуют в процессах биодegradации, но и приспособлены к жизни в строгих температурных и гидрохимических условиях, характерных для нефтебаз [3-4].

Отбор проб для микробиологических исследований выполнен согласно стандартным методикам [5-8]. Результаты таких исследований могут значительно продвинуть понимание и оптимизацию процессов биологической ремедиации на загрязненных территориях, обеспечивая более эффективное и экологически безопасное восстановление почвенного покрова. Это, в свою очередь, способствует устойчивому развитию и сохранению природных ресурсов в регионах с экстремальными климатическими условиями.

В научной работе 2023 года была осуществлена тщательная оценка химических и физических свойств почв в районах с криолитозоной, что имеет важное значение для разработки эффективных методов биодеструкции нефтяных загрязнений. Исследования показали, что влажность почвы в различных местах варьировалась от 20% до 40%, с общим средним значением около 30%. К тому же, рН-баланс этих почвенных образцов был отмечен в диапазоне от нейтрального до слегка щелочного, что может оказывать влияние на микробиологическую активность и способность почвы к самоочищению от нефтепродуктов.

Эти параметры среды необходимо учитывать при разработке и адаптации технологий биоремедиации, поскольку они могут значительно влиять на процессы биодegradации. Регуляция влажности и рН может стать ключевым элементом в повышении эффективности биологической очистки почв от нефтяных загрязнений в условиях криолитозоны. Это подчеркивает важность создания устойчивых и адаптированных к местным условиям технологий очистки, которые могут эффективно справляться с экологическими проблемами в холодных регионах.

**Таблица 1. Микробиологическая характеристика почвогрунтов территории филиала нефтебазы Республики Саха (Якутия), 2023 г.**

Шифр проб по каталогу	pH.	Актуальная влажность, %	КМАФАнМ, МПА +37°C-24 ч.	Гетеротрофные сапрофитные бактерии, МПА +30°C-72 ч.	Грибы, Агар Чапека +24°C-120 ч.	Актинобактерии, КАА +28°C-120 ч.	Олиготрофы, голодный агар (ГА) +30°C-7 суток	УОМ, ср.Мюнца с нефтью +20°C-14 су
1	4	5	6	7	8	9	10	11
T-1	7,2	25,0	1,2*10 <sup>5</sup>	3,3*10 <sup>3</sup>	Не выделены	2,2*10 <sup>3</sup>	48*10 <sup>3</sup>	Не выделены
T-2	7,3	30,0	6,8*10 <sup>5</sup>	12*10 <sup>3</sup>	3*10 <sup>3</sup>	1,6*10 <sup>3</sup>	36*10 <sup>3</sup>	1*10 <sup>3</sup>
T-3	7,0	20,0	4,3*10 <sup>5</sup>	18*10 <sup>3</sup>	2,2*10 <sup>3</sup>	1,1*10 <sup>3</sup>	33*10 <sup>3</sup>	3*10 <sup>3</sup>
T-4	6,7	25,0	38,2*10 <sup>6</sup>	22*10 <sup>6</sup>	Не выделены	0,02*10 <sup>6</sup>	43*10 <sup>6</sup>	0,03*10 <sup>6</sup>
T-5	7,3	30,0	40,1*10 <sup>6</sup>	26,2*10 <sup>6</sup>	1*10 <sup>3</sup>	0,02*10 <sup>6</sup>	42*10 <sup>6</sup>	0,06*10 <sup>6</sup>
T-6	7,1	25,0	74,2*10 <sup>6</sup>	48,1*10 <sup>6</sup>	Не выделены	0,012*10 <sup>6</sup>	68*10 <sup>6</sup>	0,002*10 <sup>6</sup>
T-7	6,7	30,0	85,5*10 <sup>6</sup>	66,6*10 <sup>6</sup>	3*10 <sup>3</sup>	0,02*10 <sup>6</sup>	92*10 <sup>6</sup>	0,001*10 <sup>6</sup>
T-8	7,1	35,0	634,4*10 <sup>6</sup>	3,3*10 <sup>6</sup>	0,08*10 <sup>6</sup>	0,08*10 <sup>6</sup>	48*10 <sup>6</sup>	0,025*10 <sup>6</sup>
T-9	6,7	35,0	833,1*10 <sup>6</sup>	2,4*10 <sup>6</sup>	0,04*10 <sup>6</sup>	0,03*10 <sup>6</sup>	33*10 <sup>6</sup>	0,018*10 <sup>6</sup>
T-10	7,2	40,0	-	-	1*10 <sup>3</sup>	Не выделены		1*10 <sup>3</sup>

**Таблица 2. Микробиологическая характеристика фоновых почв территории нефтебазы Республики Саха (Якутия), 2023 г.**

Шифр проб по	pH	Актуальная влажность	КМАФАнМ, МПА	Гетеротрофные сапрофитные	Грибы, Агар Чапека	Актинобактерии, КАА	Олиготрофы, голодный агар (ГА)	УОМ, ср.Мюнца с нефтью
--------------	----	----------------------	--------------	---------------------------	--------------------	---------------------	--------------------------------	------------------------

катал огу		нось , %	+37°C-24 ч.	бактерии, МПА +30°C-72 ч.	+24°C- 120 ч.	+28°C- 120 ч.	+30°C-7 суток	+20°C-14 су
1	4	5	6	7	8	9	10	11
А-1	8,3	16,4	28,2*10 <sup>3</sup>	16,4*10 <sup>3</sup>	3*10 <sup>3</sup>	1*10 <sup>3</sup>	42*10 <sup>3</sup>	-
А-2	8,2	15,1	3,08*10 <sup>5</sup>	262*10 <sup>3</sup>	Не выделен ы	2*10 <sup>3</sup>	315*10 <sup>3</sup>	-
А-3	8,1	13,4	958,3*10 <sup>6</sup>	922,2*10 <sup>3</sup>	6*10 <sup>3</sup>	2*10 <sup>3</sup>	926*10 <sup>6</sup>	2*10 <sup>2</sup>
А-4	7,2	13,6	2,8*10 <sup>7</sup>	1,8*10 <sup>6</sup>	3*10 <sup>3</sup>	6*10 <sup>3</sup>	3,2*10 <sup>7</sup>	-
А-5	8,3	13,1	1,1*10 <sup>8</sup>	6,3*10 <sup>7</sup>	2,6*10 <sup>3</sup>	1*10 <sup>3</sup>	1,4*10 <sup>8</sup>	-
А-6	7,5	18,2	2,6*10 <sup>7</sup>	1,4*10 <sup>6</sup>	3,8*10 <sup>3</sup>	2*10 <sup>3</sup>	2,8*10 <sup>8</sup>	2*10 <sup>3</sup>

Исследования, проведенные с использованием методов микробиологии, показали, что в почве на территории нефтебазы микроорганизмы обитают наиболее плотно по сравнению с обычной почвой. Анализы, взятые в одинаковое время, выявили, что количество гетеротрофных бактерий и КМАФАнМ на нефтебазе превышает показатели фоновых мест на 2-3 порядка (см. табл. 1, табл. 2). Высокий уровень микроорганизмов в почвах нефтебазы, вероятно, вызван присутствием УОМ, которые в почвах фоновых участков почти не встречаются, за исключением двух точек А-3 и А-6, где их содержание незначительное и не превышает 2 тыс.

В почвах территории нефтебазы средняя концентрация углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) превышала  $1 \times 10^6$  колониеобразующих единиц (КОЕ) на грамм активной сульфатредуцирующей биомассы (АСВ). Доля УОМ составляла приблизительно 80 % от общего микробного сообщества в данной зоне, что подтверждается данными, представленными в таблице 1. Проведённые исследования выявили, что почвы нефтебазы характеризуются значительно более высокой численностью актинобактерий и целлюлозолитических микроорганизмов по сравнению с контрольными (фоновыми) почвами. Средняя численность этих групп микроорганизмов превышала таковую в фоновых почвах примерно в  $10^3$  раз.

Данное явление, вероятно, обусловлено присутствием нефтепродуктов и других органических соединений, что подтверждается результатами, приведёнными в таблицах 1 и 2.

В почвах, прилегающих к нефтебазам, отмечается значительное снижение активности аммонифицирующих, денитрифицирующих и нитрифицирующих бактерий по сравнению с фоновыми почвами (см. табл. 1, 2). Сниженные численности этих функциональных групп свидетельствуют о негативном влиянии нефтяных продуктов на микробиологическую активность почвенной биоты. Данное явление является критическим показателем деградации почвенных экосистем и отражает их сниженный потенциал к биологическому самоочищению от загрязняющих веществ. Аналогичные выводы подтверждаются увеличением относительной численности олиготрофных микроорганизмов по сравнению с гетеротрофными бактериями в загрязненных почвах, что указывает на нарушение баланса микробных сообществ и адаптацию микрофлоры к стрессовым условиям загрязнения [11-12].

Превалирование олиготрофных микроорганизмов над гетеротрофными бактериальными сообществами может служить ключевым индикатором сниженной биологической активности почв нефтебазы, отражая ограниченную способность микробиоты к разложению органических веществ. Такие сдвиги в микробном сообществе свидетельствуют о нарушениях в процессе минерализации углерода и свидетельствуют о деградации экологического состояния почвенных экосистем в условиях нефтепродуктного загрязнения [13-14]. Анализ структуры микробных сообществ и их функциональной активности является важным инструментом для оценки степени биоремедиации и восстановления почв [15].

По показателям биотестирования почвы нефтебазы классифицируются от сильно до среднетоксичных. Всхожесть семян тест-растений в почвах составил от 16 до 36 % в сравнении с контролем (98%).

Исследование микрофлоры почв на территории нефтебазы, проведенное в 2023 году, позволило выявить разнообразие микроорганизмов, присутствующих

в образцах. В ходе анализа было установлено, что бактериальные сообщества преобладают над другими группами микроорганизмов, что схоже с данными по фоновым почвам. Это доминирование бактерий в структуре микробиома может быть связано с их способностью адаптироваться к изменениям окружающей среды.

В состав микрофлоры входили не только бактерии, но и микроскопические грибы, включая виды родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium* и *Mucor*. Эти грибы известны своей способностью выживать в условиях высокой токсичности, что указывает на их потенциал в биоремедиации загрязненных территорий.

Актинобактерии, обладающие характеристиками, промежуточными между бактериями и грибами, были представлены родами *Actinomyces* и *Rhodococcus*. Эти микроорганизмы часто участвуют в процессах разложения органических веществ и могут способствовать улучшению плодородия почвы.

Среди бактериальной микрофлоры были выделены несколько родов, адаптированных к условиям нефтезагрязненной почвы. Преобладали специфические группы, такие как неферментирующие бактерии родов *Pseudomonas* и *Stenotrophomonas*, энтеробактерии родов *Proteus* и *Enterobacter*, аэробные спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, а также анаэробные бактерии рода *Clostridium*. Эти микроорганизмы играют важную роль в круговороте веществ в экосистемах, особенно в условиях антропогенного воздействия.

Таким образом, исследование подтвердило высокую адаптивность и разнообразие микробиома почв нефтебазы, подчеркивая важность дальнейших исследований в этой области для разработки стратегий биоремедиации и оценки экологического состояния подобных территорий.

На основании результатов микробиологического анализа почв нефтебазы можно сформулировать следующие выводы: почвенные образцы данного объекта характеризуются пониженной минерализационной активностью, что свидетельствует о сниженной способности микробиоты к разложению и

минерализации органических веществ. Анализ микробного сообщества выявил доминирование олиготрофных микроорганизмов в сравнении с численностью гетеротрофных бактерий, что указывает на дисбаланс в структуре микробного комплекса и недостаточную эффективность биохимических процессов, обеспечивающих круговорот веществ и биологическое плодородие почв. Данная микробиологическая характеристика, вероятно, обусловлена длительным воздействием нефтяных загрязнителей и сопутствующих токсичных химических соединений, которые оказывают негативное влияние на функциональную активность и жизнеспособность почвенной микрофлоры. Таким образом, выявленные изменения микробиоты могут служить индикатором деградации почвенного экосистемного состояния и ограниченного потенциала естественной биоремедиации на территории нефтебазы.

В почвенных образцах, подвергнутых исследованию, выявлены значительные нарушения процессов минерализации органического вещества, что подтверждается низкими значениями коэффициента минерализации (<1 усл. ед.) во всех случаях. Данное явление, вероятно, обусловлено присутствием токсичных компонентов в почве, таких как тяжелые металлы, либо дефицитом природного органического вещества. В условиях ограниченного количества минерализуемого органического материала процессы минерализации оказываются недостаточно обеспеченными. Для восстановления функциональной активности минерализационных процессов в почве необходим комплексный подход, включающий стимулирование активности почвенной микрофлоры, создание оптимальных условий для их жизнедеятельности, а также повышение содержания органического вещества посредством внесения органических удобрений и инокуляции микоризных грибов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011200369-1) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.*

## Список литературы:

1. Atlas, R.M., Hazen, T.C.. Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. / *Environmental Science & Technology* //, 45(16), 2011, 6709–6715.
2. Margesin, R., Schinner, F.. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. / *Applied Microbiology and Biotechnology* //, 56(5-6), 2001, 650–663.
3. Cappello, S., Maugeri, T.L., Lentini, V., Smedile, F., Yakimov, M.M., Giuliano, L. Biodegradation of hydrocarbons under psychrophilic conditions. / *Applied Microbiology and Biotechnology* //, 97(4), 2013, 1571–1580.
4. Yakimov, M.M., Timmis, K.N., Golyshin, P.N. Obligate oil-degrading marine bacteria. / *Current Opinion in Biotechnology* //, 18(3), 2007, 257–266.
5. ГОСТ ИСО 14698-1-2005. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Контроль биозагрязнений. Часть 1. Общие принципы и методы.
6. ГОСТ 17.4.2.01 – 2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (с Поправкой).
7. ГОСТ 17.4.2.02. – 2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа" (введен в действие Приказом Росстандарта от 17.04.2018 N 202-ст).
8. МУК 4.2.3695-21. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы. Методические указания" (утв. Роспотребнадзором 02.06.2021)
9. Atlas, R. M., & Hazen, T. C Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. / *Environmental Science & Technology*//, 45(16), 2011, 6709–6715.

10. Jones, C. M., & Hallin, S. The microbial nitrogen cycle. / *Environmental Microbiology Reports*//, 11(2), 2019, 1-15.
11. Khan, S., et al. Impact of petroleum hydrocarbon contamination on soil microbial community structure and function. / *Environmental Pollution* //, 2020, 265, 114912.
12. Zhang, L., et al. Effects of oil contamination on soil microbial diversity and enzyme activity. / *Science of The Total Environment* //, 2019, 665, 297–305.
13. Smith, J. A., Brown, L. R., & Johnson, M. E. Microbial indicators of soil health under petroleum hydrocarbon contamination. / *Environmental Microbiology* //, 20(4), 2018, 1234–1245.
14. Zhang, Y., & Wang, Q. Oligotrophic bacteria as bioindicators of reduced soil microbial activity in contaminated environments. / *Applied Soil Ecology* //, 2020, 147, 103399.
15. Jones, D. L., Murphy, D. V., & Khalid, M. Microbial community dynamics during bioremediation of petroleum-contaminated soils. / *Soil Biology and Biochemistry* //, 2019, 134, 159–168.